

鄂尔多斯盆地北部直罗组地下水地球化学特征及其指示意义

孙魁¹, 范立民^{1,2}, 马万超¹, 陈建平¹, 彭捷¹, 张鹏华¹, 高帅¹, 李成¹, 苗彦平³, 王宏科⁴

(1. 陕西省地质环境监测总站 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 陕煤集团神木红柳林矿业公司, 陕西 榆林 719000; 4. 陕西陕煤陕北矿业有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要:煤矿水害是陕北侏罗纪煤田的主要灾害, 直罗组地下水是主要突水水源之一。为研究鄂尔多斯盆地北部直罗组地下水地球化学特征及其指示意义, 借助 Durov 图、Piper 三线图、Gibbs 图、Stiff 图以及主成分分析等手段, 深入研究直罗组地下水地球化学特征, 阐释其对直罗组与上覆含水层之间水力联系及地下水径流条件的指示意义。结果表明: 自西部正常基岩区至东部风化基岩区, 直罗组地下水 pH 以及 TDS、 K^+Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 质量浓度均呈现出逐渐减小的趋势。直罗组地下水水化学类型存在一定差异, 西部直罗组埋藏较深区域, 地下水水化学类型以 SO_4-Na 型、 $SO_4 \cdot Cl-Na$ 型和 $HCO_3 \cdot SO_4-Na$ 型为主, 向东至直罗组基岩风化区, 地下水类型过渡为 HCO_3-Ca 型和 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型等。直罗组地下水水化学形成受岩石风化作用、交替吸附作用、脱硫酸作用以及溶滤作用的控制。氢氧同位素和水化学特征对含水层之间水力联系具有明显的指示作用, 氢氧同位素、典型钻孔地下水水化学离子浓度和区域地下水水化学特征分析表明, 研究区西部直罗组正常基岩地下水与洛河组、萨拉乌苏组地下水基本不存在水力联系; 东部直罗组风化基岩与萨拉乌苏组地下水水力联系紧密。卤族元素 Cl^- 对直罗组地下水径流条件指示作用明显, 研究区西部直罗组正常基岩地下水径流滞缓, 地下水以静储量为主; 而在基岩风化区, 由于直罗组风化基岩孔隙、裂隙发育, 储水性和渗透性明显增强, 并与第四系地下水发生了强烈的混合作用, 地下水径流强度大, 地下水以动储量为主。

关键词:直罗组含水层; 水化学特征; 水力联系; 地下水径流条件; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)04-2004-17

Geochemical characteristics of groundwater about Zhiluo Formation in the northern Ordos Basin and its indicative significance

SUN Kui¹, FAN Limin^{1,2}, MA Wanchao¹, CHEN Jianping¹, PENG Jie¹, ZHANG Penghua¹, GAO Shuai¹, LI Cheng¹, MIAO Yanping³, WANG Hongke⁴

(1. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, MNR/Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Xi'an 710054, China; 2. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Hongliulin Mine of Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Yulin 719000, China; 4. Northern Shaanxi Mining Co., Ltd., of Shaanxi Coal Group, Yulin 719000, China)

Abstract: Coal mine water disaster is the main disaster of the Jurassic coalfield in the northern Shaanxi and the groundwa-

收稿日期: 2023-04-25 修回日期: 2023-09-18 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0537

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFC1805404); 陕西煤业化工集团有限公司 2020 年度重点科研资助项目 (2020SMHKJ-B-J-27); 陕西省自然科学基金基础研究计划-陕煤联合基金重点资助项目 (2019JLZ-03)

作者简介: 孙魁 (1988—), 男, 河南周口人, 博士。E-mail: 793626676@qq.com

通讯作者: 范立民 (1965—), 男, 山西曲沃人, 教授。E-mail: 498518851@qq.com

引用格式: 孙魁, 范立民, 马万超, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组地下水地球化学特征及其指示意义[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2004-2020.

SUN Kui, FAN Limin, MA Wanchao, et al. Geochemical characteristics of groundwater about Zhiluo Formation in the northern Ordos Basin and its indicative significance[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 2004-2020.



移动阅读

ter of the Zhiluo Formation is one of the main water inrush sources. Using the Durov diagram, Piper three-line diagram, Gibbs diagram, Stiff diagram and principal component analysis method, the geochemical characteristics of the Zhiluo Formation groundwater in the northern Ordos Basin and its indicative significance were investigated in this study. Also, it studied the geochemical characteristics of groundwater and explains its significance for the hydraulic connection between the Zhiluo Formation and overlying aquifer and the groundwater runoff conditions. The results show that the concentrations of the pH, TDS, $K^+ + Na^+$, SO_4^{2-} and Cl^- show a decreasing trend about the Zhiluo Formation groundwater from the western normal bedrock area to the eastern weathered bedrock area. And there are some differences about the Zhiluo Formation groundwater chemical types. For the deep buried area of the Zhiluo Formation in the west, the hydrochemical types of groundwater are mainly SO_4-Na type, $SO_4 \cdot Cl-Na$ type and $HCO_3 \cdot SO_4-Na$ type. For the bedrock weathering area of the Zhiluo Formation in the east, the groundwater type transitions to HCO_3-Ca type and $HCO_3-Ca \cdot Mg$ type. The hydrochemical formation of the Zhiluo Formation groundwater is controlled by rock weathering, alternating adsorption, desulfuration and leaching. Hydrogen isotope and oxygen isotope and hydro-chemical characteristics have obvious indicative effects on the hydraulic connection between aquifers. The analysis of hydrogen isotope and oxygen isotope, chemical ion concentration of typical borehole groundwater and regional groundwater hydro-chemical characteristics shows that there is no hydraulic connection between the normal bedrock groundwater of the Zhiluo Formation and the groundwater of the Luohe Formation and the Salawusu Formation in the western part of the study area. The weathered bedrock groundwater of the Zhiluo Formation in the eastern part is closely related to the Salawusu Formation groundwater. The halogen element (Cl^-) has obvious indication effect on the runoff conditions of the Zhiluo Formation groundwater. The normal bedrock groundwater runoff of the Zhiluo Formation in the western is slow and the groundwater is mainly static reserves. For the bedrock weathering area, due to its development of pores and fissures, the water storage and permeability are significantly enhanced and there is a strong mixing effect with the Quaternary groundwater. So the groundwater runoff intensity is large and the groundwater is mainly dynamic reserves.

Key words: Zhiluo Formation aquifer; hydro-chemical characteristics; hydraulic connection; runoff conditions of groundwater; Ordos Basin

2021年鄂尔多斯盆地原煤产量约28亿t,占全国的72%左右,盆地北部的陕北侏罗纪煤田,2022年原煤产量达5.82亿t,占我国原煤产量的12.90%,在国家能源安全中具有重要意义^[1-2]。由于煤层埋藏浅,开采强度大,且煤层上部含隔水层组合类型复杂多样,顶板水害一直是威胁矿井安全生产的主要灾害^[3]。直罗组广泛分布于鄂尔多斯盆地,近年来盆地北部的榆神府矿区、呼尔吉特矿区、纳林河矿区煤矿开采过程中频频受到直罗组地下水的威胁,甚至发生突水事故,对于直罗组地下水系统、水化学特征以及水害防治研究逐渐成为焦点^[4-5]。

水文地球化学特征可反映水文地质系统内复杂的地下水径给排关系,常用于研究地下水系统、水源判别以及地下水径流等^[6-7]。张保建等^[8]系统研究了鄂尔多斯盆地侏罗系地下水系统,阐释了侏罗系地下水水化学及同位素特征。范立民等^[9]以榆神府矿区煤层上部各含水层地下水为研究对象,探究了矿区地下水化学特征及形成机理。孙亚军等^[10]研究了煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制,提出了多场耦合作用等问题的研究展望。董东林等^[11]构建了榆

神府矿区水环境评价模型,通过改进型的可拓评价方法对榆神府矿区水环境进行了精准刻画。谢臣臣等^[12]分析了榆神府矿区北部侏罗系直罗组地下水化学特征,探究神府矿区直罗组含水层地下水化学形成机制和控制因素。靳德武等^[13]系统阐述了宁东煤田东北部高矿化度地下水分布特征,并探讨了高矿化度地下水形成机制。曾一凡等^[14]分析了曹家滩煤矿各含水层地下水和矿井水化学特征及其成因,基于水化学场机器学习分析与水动力场反向示踪模拟耦合,对矿井涌(突)水源进行了判别。刘基^[15]研究了呼吉尔特矿区深埋含水层水文地球化学特征,确定了矿区深埋含水层与上覆浅层含水层之间的水力联系。王强民等^[16]构建了榆神矿区不同充水含水层水化学和氢、氧同位素基础特征值,对不同煤层埋深煤矿的矿井涌水来源进行了识别。柳菲等^[17]应用 Cl^- 和氢氧稳定同位素,研究了敦煌盆地第四系含水层地下水的演化和补给过程。

笔者以鄂尔多斯盆地北部榆神矿区北部—神府矿区南部直罗组地下水为研究对象,对矿区以往勘探过程中取得的水化学特征数据进行深入挖掘,分析直

罗组地下水化学特征, 深入探讨水化学特征对直罗组与上覆含水层之间水力联系及地下水径流条件的指示意义, 以期为直罗组地下水系统研究和灾害防控提供依据。

1 研究区概况

研究区位于陕北侏罗纪煤田榆神矿区北部—神府矿区南部, 地势西北高、东南低, 西部主要为风沙滩地, 东部侵蚀沟谷与黄土梁峁相间分布, 区内构造简单。地层由老到新依次有: 三叠系上统永坪组, 侏罗系下统富县组, 侏罗系中统延安组、直罗组、安定组, 白垩系下统洛河组, 新近系上新统保德组, 第四系中更新统离石组, 第四系上更新统萨拉乌苏组, 第四系全新统风积沙及冲积层。煤层埋深由西向东逐渐变浅, 主要可采煤层为 1⁻²、2⁻²、3⁻¹、4⁻²、5⁻²。研究区主要含水层自上而下, 分别为第四系松散层孔隙潜水含水层 (第四系全新统冲积层 Q_{4al}、风积沙 Q_{4eol} 和萨

拉乌苏组 Q_{3s})、白垩系洛河组含水层 (K_{1l})、侏罗系中统安定组裂隙承压含水层 (J_{2a}) 和侏罗系中统直罗组裂隙潜水-承压含水层 (J_{2z})。

直罗组主要分布于研究区的中西部, 厚度 0~304.17 m。厚度总体变化趋势为由西向东逐渐变薄直至尖灭 (图 1)。受沉积环境的控制, 研究区直罗组可分为 3 段: 上段以曲流河三角洲沉积体系为主, 中段以湖泊三角洲沉积体系为主, 下段以辫状河三角洲沉积体系为主。受早白垩世以来多次构造运动和强烈不均匀风化影响, 研究区东部洛河组、安定组剥蚀殆尽, 直罗组遭受长期风化, 并与上部新近系之间形成角度不整合面, 这种角度不整合面是识别直罗组风化基岩的重要界面^[18-19] (图 2)。研究区直罗组风化基岩厚度 3.04~83.46 m, 平均约 26 m, 岩层风化裂隙较发育, 自上而下裂隙发育程度逐渐减弱, 上部 6~10 m 岩石强烈风化, 岩石网状裂隙发育, 富水性较强, 是区内矿井主要充水含水层。

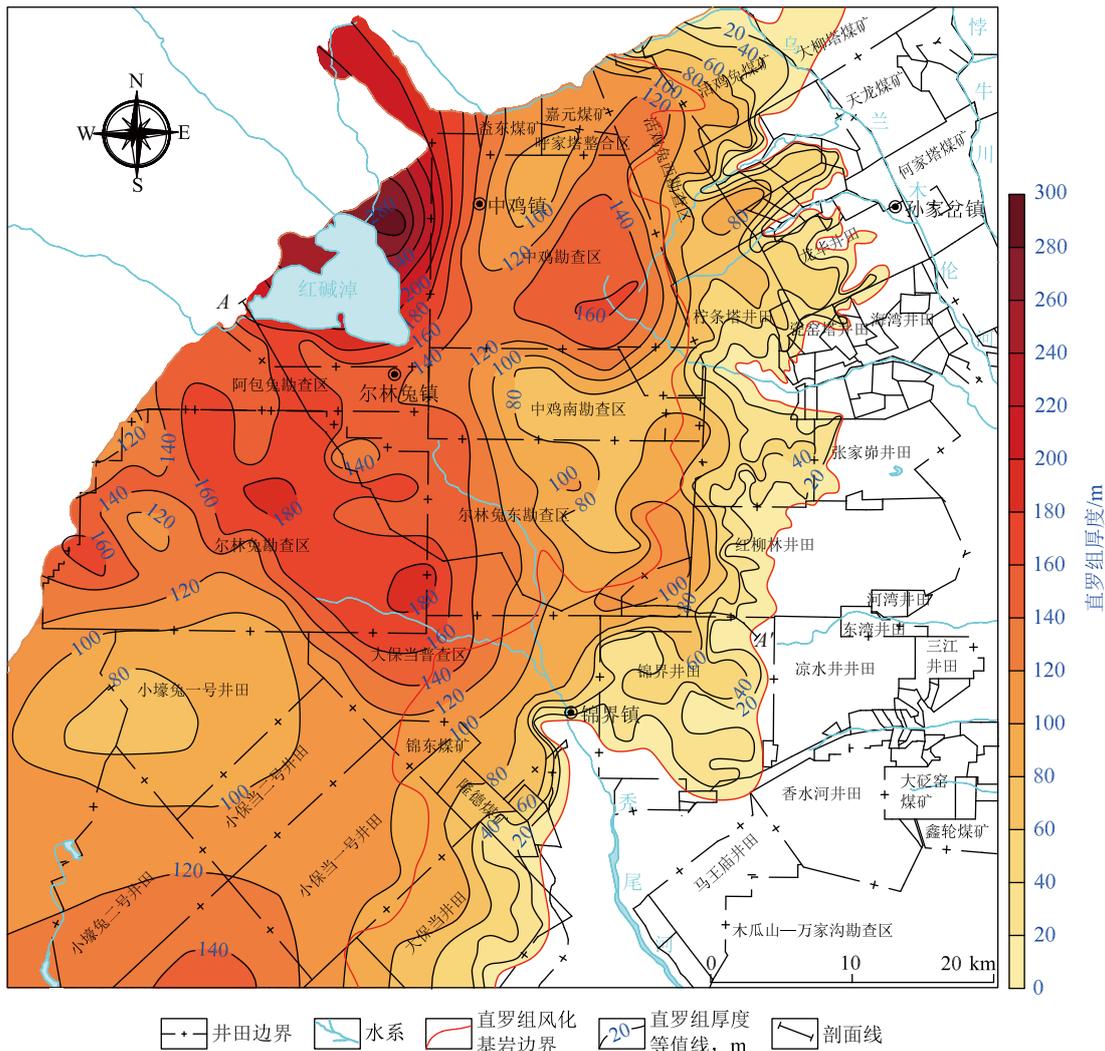


图 1 直罗组厚度等值线

Fig.1 Thickness contour of Zhiluo Formation

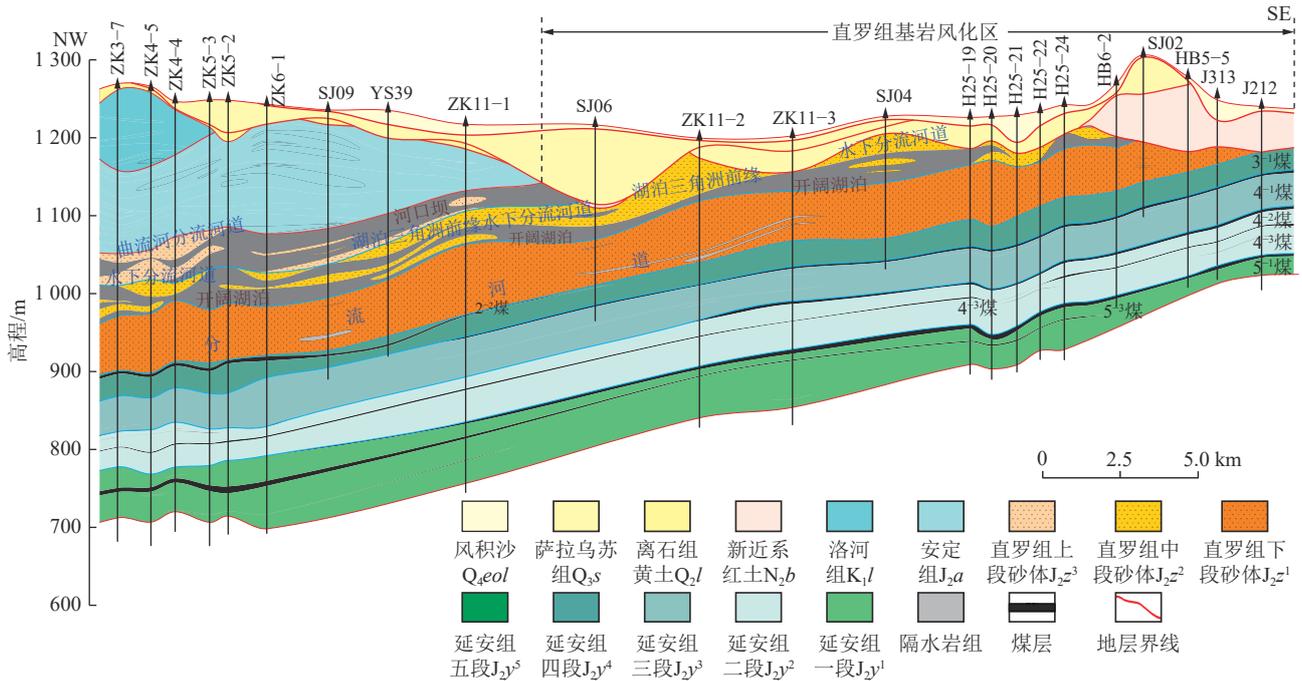


图2 直罗组沉积断面^[5]

Fig.2 Sedimentary section of Zhiluo Formation^[5]

2 材料与方法

2.1 样品采集

为研究直罗组地下水化学特征,笔者团队通过系统搜集和现场采样测试获取直罗组地下水水化学数据共计 105 组,其中直罗组风化基岩地下水 60 组(包括氢氧同位素样品 2 组),风化和正常基岩混合水 27 组(包括氢氧同位素样品 2 组),正常基岩地下水 18 组(包括氢氧同位素样品 6 组)。为研究直罗组与其他含水层之间的水力联系,通过搜集和现场采样测试获取洛河组地下水水化学数据 12 组,萨拉乌苏组地下水水化学数据 46 组(包括氢氧同位素样品 5 组)(图 3)。样品采集采用预清洗灭菌的 5 L 高密度聚乙烯瓶,采样前用待取水样进行润洗 2~3 次,密封、标注采样信息后分别送往样品检测机构进行检测。

2.2 样品测试

水化学特征测试由陕西煤田地质化验测试有限公司完成,同位素样品测试由国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心(中国地质科学院水文地质环境地质研究所)完成。检测的主要项目为 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、TDS、pH 以及 D 和 ^{18}O 同位素等。其中,pH 和 水温由现场测定;TDS 采用干燥称重法测定; Cl^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子采用离子色谱仪测定; K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子采用电感耦合等离子体发射光谱法测定; HCO_3^- 采用滴定法测定;D 和 ^{18}O 采用 L2130i 型水同位素分析仪进行测试。

3 直罗组地下水化学特征

3.1 直罗组地下水常规离子质量浓度分布特征

直罗组风化基岩地下水 pH 值 7.30~8.90,矿化度 161.80~423.10 mg/L。阳离子质量浓度关系为 $Ca^{2+} > (K^+ + Na^+) > Mg^{2+}$,阴离子质量浓度关系为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$, SO_4^{2-} 质量浓度变异系数大于 1,空间分布差异性较大;直罗组正常基岩与风化基岩混合水 pH 介于 7.30~8.74,矿化度 207~774 mg/L。阳离子质量浓度关系为 $Ca^{2+} > (K^+ + Na^+) > Mg^{2+}$,阴离子质量浓度关系为 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$, $K^+ + Na^+$ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 质量浓度变异系数大于 1,空间分布差异性较大;直罗组正常基岩地下水 pH 值 7.4~10.95,矿化度 256~4 692 mg/L。阳离子质量浓度关系为 $(K^+ + Na^+) > Ca^{2+} > Mg^{2+}$,阴离子质量浓度关系为 $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$, $K^+ + Na^+$ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 质量浓度变异系数大于 1,空间分布差异性较大(表 1)。

由图 4 可知,直罗组风化基岩地下水、风化基岩与正常基岩混合水、正常基岩地下水中各离子质量浓度存在差异,阳离子中 $K^+ + Na^+$ 质量浓度呈现增大趋势, Ca^{2+} 质量浓度基本相等, Mg^{2+} 质量浓度呈小幅度降低;阴离子中 HCO_3^- 质量浓度基本一致, SO_4^{2-} 、 Cl^- 质量浓度显著增大;直罗组正常基岩地下水矿化度明显高于其他地下水。为直观的分析直罗组地下水主要常量组分的分布及变化规律,绘制了研究区地下水 Durov 图(图 5)及主要离子质量浓度分布(图 6)。由图 5 和

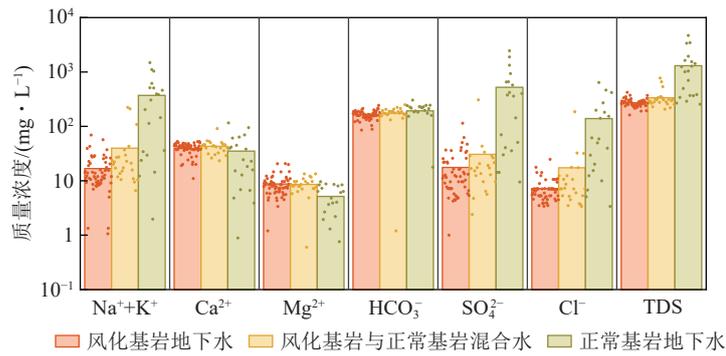


图 4 直罗组地下水离子质量浓度均值

Fig.4 Mean value of ion concentration in groundwater of Zhiluo Formation

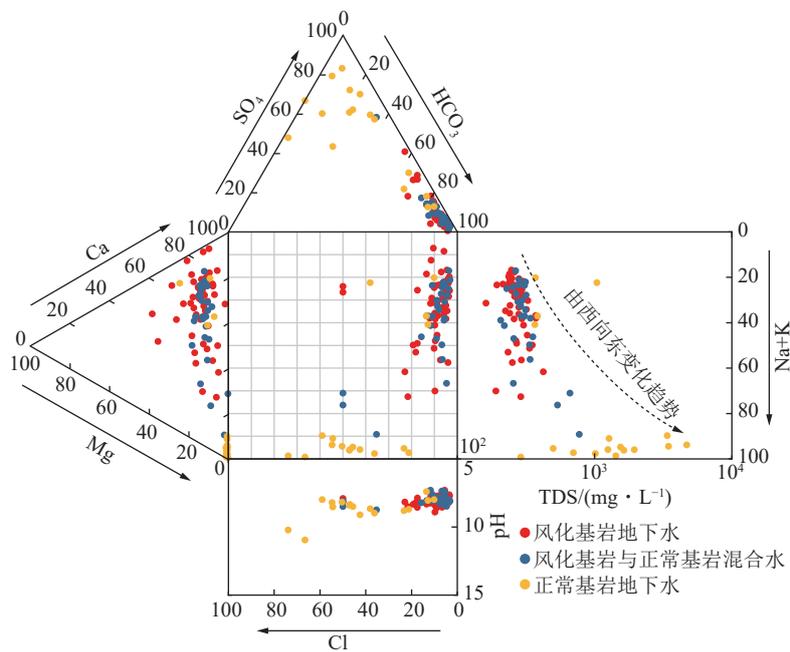


图 5 直罗组地下水 Durov 图

Fig.5 Durov diagram of groundwater in Zhiluo Formation

图 6 可知, 自西部正常基岩区至东部风化基岩区, 地下水 TDS、 K^+Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 质量浓度均呈现出逐渐减小的趋势。

3.2 直罗组地下水水化学类型

研究区直罗组地下水类型存在一定的差异。由图 7 可知, 阴离子中直罗组风化基岩、风化基岩与正常基岩混合地下水均靠近 HCO_3^- 端元, 而直罗组正常基岩地下水靠近 SO_4^{2-} 端元; 阳离子中直罗组风化基岩、风化基岩与正常基岩混合地下水主要分布在 Ca 端元, 正常基岩地下水中部分样品 K^+Na^+ 质量浓度百分比接近 90%; 直罗组风化基岩、风化基岩与正常基岩混合地下水多数样品分布在菱形图的左角, 碳酸硬度超过 50%, 而正常基岩地下水多数样品分布在菱形图的右角, 非碳酸岩碱金属超过 50%。

直罗组地下水水化学类型较为复杂, 西部直罗组

埋藏较深区域, 地下水水化学类型以 SO_4-Na 型、 $SO_4 \cdot Cl-Na$ 型和 $HCO_3 \cdot SO_4-Na$ 型地下水为主, 该区域矿化度整体较高, 一般在 1 500 mg/L 以上。沿着地下水总体流向向东至直罗组基岩风化区, 地下水类型发生了改变, 过渡为 HCO_3-Ca 型、 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 型、 $HCO_3-Ca \cdot Na$ 型, 在东部煤矿集中开采区, 局部有 $HCO_3 \cdot SO_4-Ca \cdot Mg$ 型、 $HCO_3 \cdot SO_4-Ca \cdot Na$ 型水, 矿化度较低, 一般不会超过 500 mg/L, 多数在 250~300 mg/L。

3.3 直罗组地下水水化学形成机制

3.3.1 岩石风化作用

Gibbs 图利用 TDS 与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 的相互关系来研究地下水的形成机制, 包括蒸发浓缩作用、岩石风化以及大气降水作用^[20]。由图 8(a) 可以看出, 直罗组风化基岩地下水、风化基岩与正常基岩混

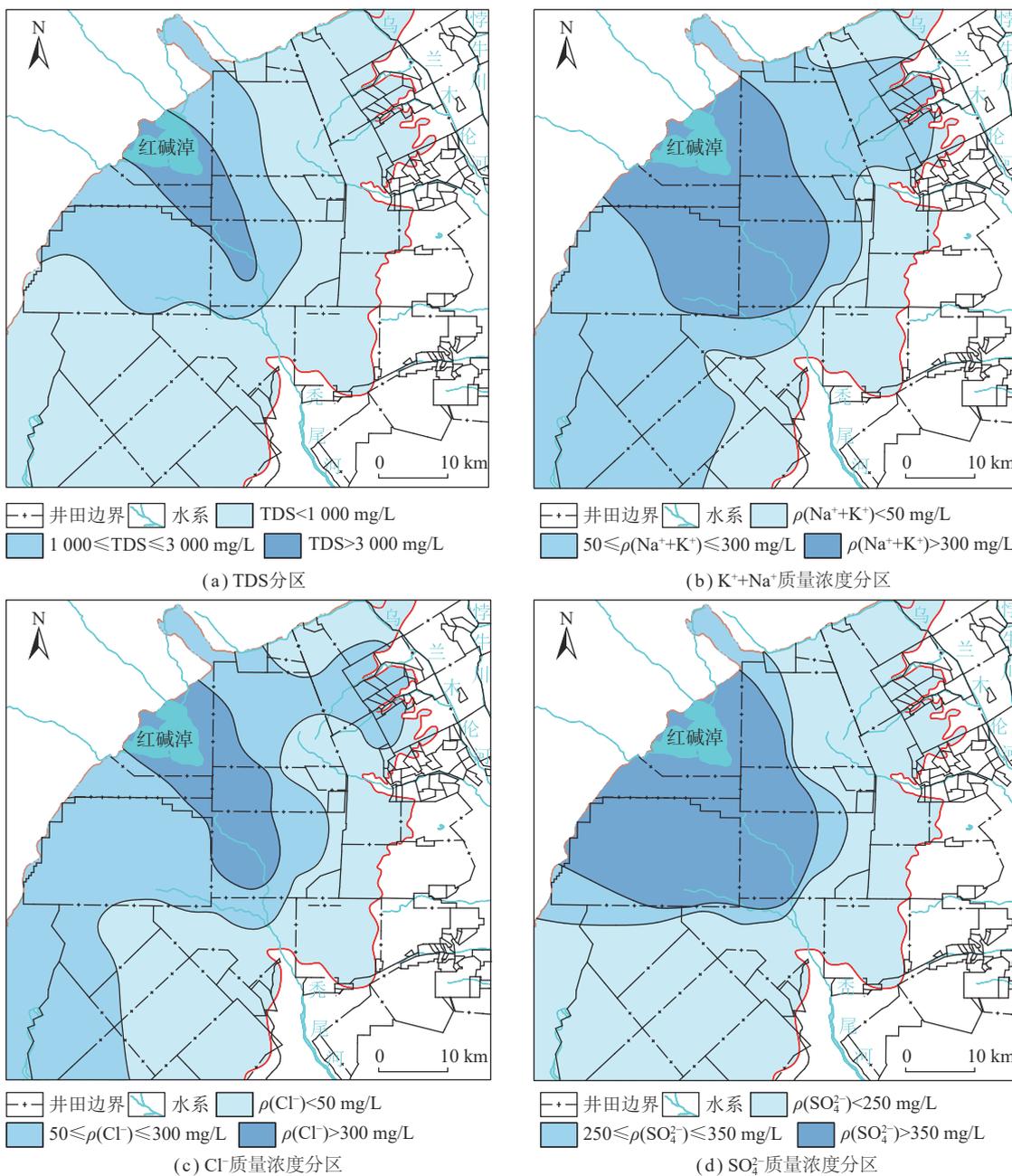


图 6 直罗组地下水主要离子质量浓度分区

Fig.6 Zoning of main ion concentrations in groundwater of Zhiluo Formation

合水基本全部落在岩石风化控制区域,而正常基岩地下水多数靠近或落在蒸发浓缩区域。由图 8(b)可以看出,直罗组风化基岩地下水、风化基岩与正常基岩混合水基本全部落在岩石风化控制区域,而正常基岩地下水部分水样点落在 $\rho(Na^+)/[\rho(Na^+)+\rho(Ca^{2+})]>0.6$ 的范围之外。因此,直罗组风化基岩地下水、风化基岩与正常基岩混合水以岩石风化控制型为主。而直罗组正常基岩地下水存在蒸发浓缩作用,符合其埋藏深度大,水循环条件差,径流滞缓的赋存特点,但部分水样点位于 3 种类型区域以外,说明直罗组正常基岩地下水化学成分还受到其他因素的控制,如阳离子的

交替吸附作用。

3.3.2 交替吸附作用

在岩石和地下水长期相互作用的过程中,岩石表面所携带的负电荷可以吸附地下水中的阳离子,从而将原先所携带的阳离子释放到地下水中,即发生阳离子交替吸附作用^[21]。 $K^+ + Na^+ - Cl^-$ 和 $Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^-$ 的毫克当量浓度关系常用来确定地下水中是否发生阳离子交换作用,如果发生了阳离子交换作用,则 2 者之间应呈线性关系,斜率为-1 左右。图 9(a)中大部分水样位于-1 比值线附近,表明研究区中地下水存在阳离子交替吸附作用。

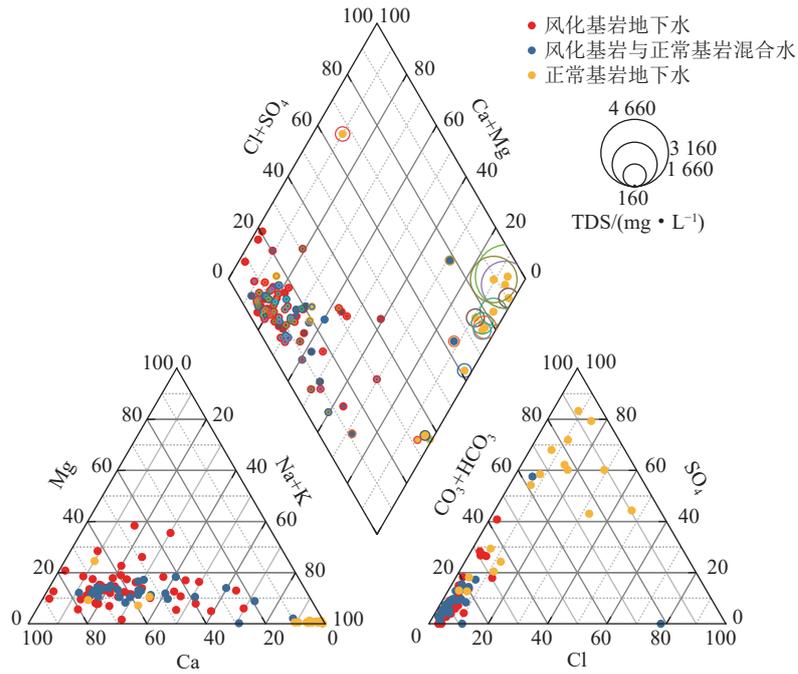


图 7 研究区直罗组地下水 Piper 图

Fig.7 Piper diagram of groundwater in Zhiluo Formation

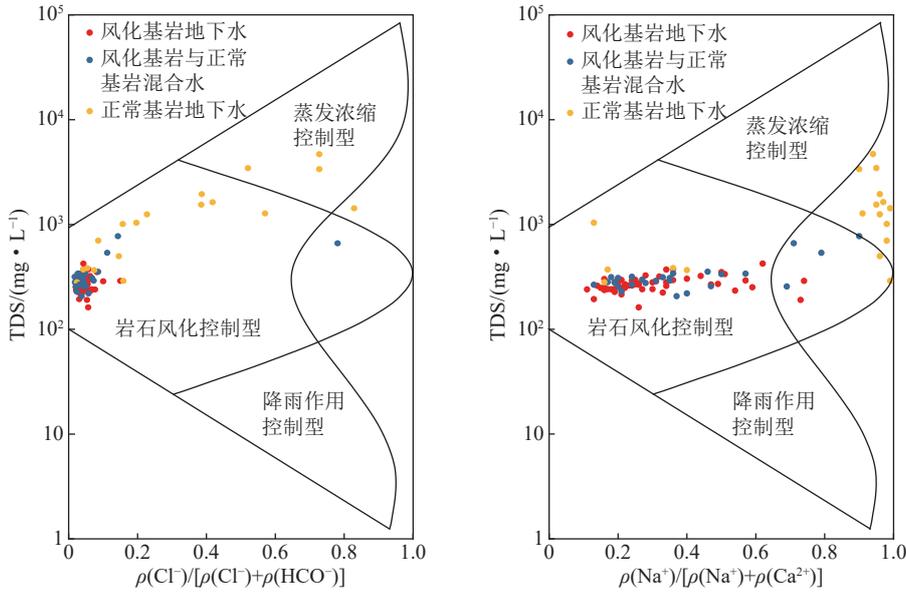


图 8 研究区直罗组地下水 Gibbs 图

Fig.8 Gibbs map of groundwater in the Zhiluo Formation of the research area

SCHOELLER 提出了 2 个指标 (CAI-1 和 CAI-2) 来判断地下水中发生了何种阳离子交换作用^[2], 其计算公式为

$$CAI-1 = \frac{c(Cl^-) - [c(Na^+) + c(K^+)]}{c(Cl^-)} \quad (1)$$

$$CAI-2 = \frac{c(Cl^-) - c(Na^+) + c(K^+)}{c(SO_4^{2-}) + c(HCO_3^-)} \quad (2)$$

以毫克当量为单位绘制氯碱指数图, 如图 9(b) 所示, 只有少部分直罗组风化基岩水样两指标值为正值,

其他全部为负值, 说明了研究区直罗组地下水中主要发生了阳离子反交换作用, 尤其是正常基岩地下水两指标值都偏负, 说明反交换作用较为强烈, 即地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与围岩中 K^+ 、 Na^+ 发生了交换, 导致水体中的 K^+ 、 Na^+ 质量浓度增大, 这一现象也解释了部分正常基岩水样点不符合 Gibbs 图规则的原因。

3.3.3 脱硫酸作用

脱硫酸作用是指地下水中的 SO_4^{2-} 被还原, 导致水中的 SO_4^{2-} 质量浓度下降, 同时 HCO_3^- 增多的过程, 其主要化学式为

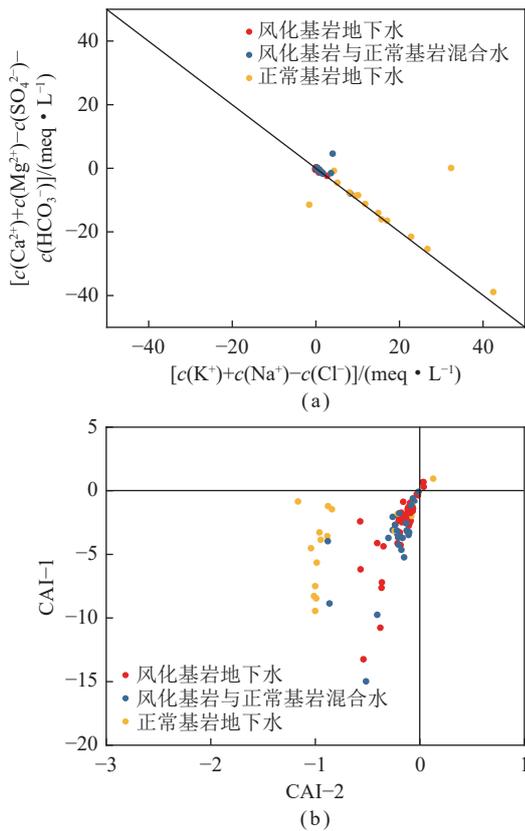
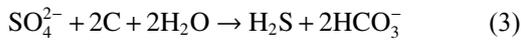


图9 交替吸附作用

Fig.9 Alternative adsorption



脱硫酸系数 $c(\text{SO}_4^{2-})/c(\text{Cl}^-)$ 是可以很好的衡量矿区地下水脱硫酸作用强度^[23],如图10所示,风化基岩地下水、风化基岩与正常基岩混合水脱硫酸系数与 HCO_3^- 含量相关性很小,说明 HCO_3^- 存在其他来源。直罗组正常基岩地下水脱硫酸系数整体较大,且随着脱硫酸系数的增大,脱硫酸作用逐渐减弱, HCO_3^- 毫克当量浓度逐渐变小,说明正常基岩地下水中 HCO_3^- 主要来自脱硫酸作用。

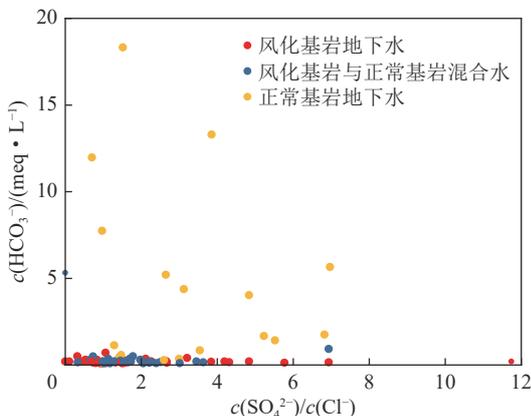


图10 脱硫酸系数

Fig.10 Desulfurization coefficient diagram

3.3.4 溶滤作用

由上述分析可知该研究区地下水主要受岩石风化作用、离子交换和脱硫酸作用影响。根据研究区各含水层地下水的离子毫克当量浓度,绘制不同离子间关系图,可进一步分析主要离子的来源。

Cl^- 是地下水中的稳定离子,因此,以 Cl^- 为切入点,探究与之相关的其他阳离子来源^[23]。由图11(a)可知各组水样绝大部分水样点的 $c(\text{Na}^+)/c(\text{Cl}^-)$ 基本都大于1,即 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 毫克当量浓度高于 Cl^- ,由此可以推测 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 的来源除岩盐溶解作用外,存在其他来源,如阳离子的交换吸附作用以及硅酸盐溶解。通过前文地下水交替吸附作用分析结果,研究区地下水阳离子反交换强烈,此外,通过对研究区59组岩石样品的铸体鉴定结果,直罗组岩石中斜长石碎屑体积分数10%~28%,高岭土杂基体积分数1%~6%,说明硅酸盐矿物体积分数较高,长期的水岩作用下,导致 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 质量浓度较高等。

水中主要矿物来源可利用 $[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})]/[c(\text{HCO}_3^-) + c(\text{SO}_4^{2-})]$ 的比值分析。由图11(b)可知,各含水层水样点大部分落在1:1直线下方,部分直罗组风化基岩、风化基岩与正常基岩比值更接近于1:1,说明2者地下水水化学形成相近,存在碳酸盐和硅酸盐溶解。直罗组正常基岩偏离1:1线幅度较大,表明水中 $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ 的毫克当量浓度大于 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$,主要来源于硅酸盐的溶解作用,此外,由于地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与含水介质表面吸附的 Na^+ 、 K^+ 发生了离子交换,使其毫克当量浓度减少,进一步证实了交替吸附作用的分析结果。

由图11(c)和图11(d)可知,研究区直罗组风化基岩、风化基岩与正常基岩混合水样基本落在 $[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})]/c(\text{SO}_4^{2-}) > 1$ 范围,说明硫酸盐的溶解不是矿区地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 的唯一来源, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 有碳酸盐的溶解作用等。绝大多数直罗组正常基岩地下水样品 $[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})]/c(\text{SO}_4^{2-}) < 1$,说明 SO_4^{2-} 有其他来源等,如盐岩溶解和硫化物的氧化等。通过对研究区36组岩石样品矿物鉴定结果,直罗组岩石中黄铁矿,体积分数一般小于1%,部分达到5%,此外,研究区直罗组砂体对延安组地层存在冲刷作用,局部地区与延安组1号、2号煤层直接接触,由此判断,直罗组在长期地下水运移和水岩作用下,硫化物的氧化是导致正常基岩 SO_4^{2-} 质量浓度较高的主要原因。在碳酸盐溶解中, $[c(\text{Ca}^{2+}) + c(\text{Mg}^{2+})]/c(\text{HCO}_3^-)$ 理论值等于1/2,该研究区直罗组风化基岩、风化基岩与

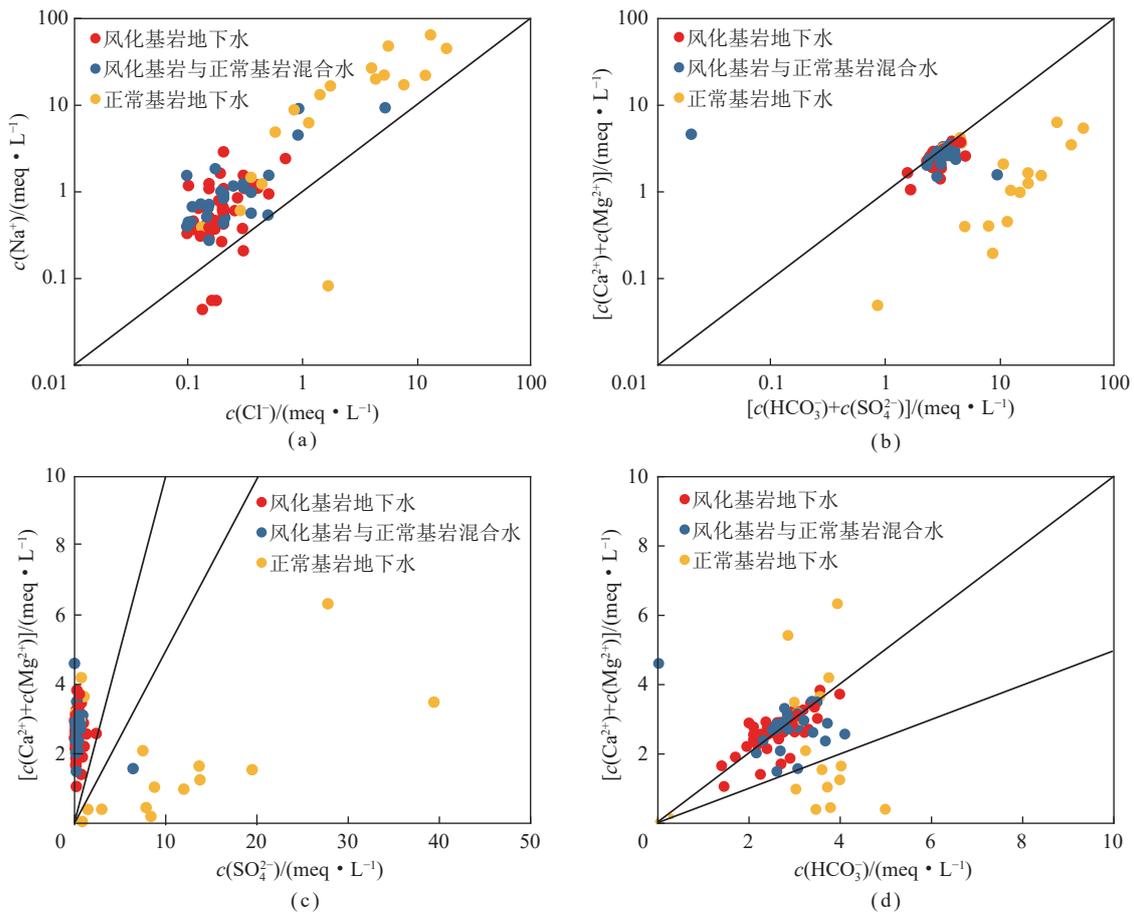


图 11 离子间比值关系

Fig.11 Ratio relationship between ions

正常基岩混合水样 $[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]/c(\text{HCO}_3^-)$ 全部大于 1/2,说明 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 有阳离子交换作用等来源。研究区大多数直罗组正常基岩的水样点 $[c(\text{Ca}^{2+})+c(\text{Mg}^{2+})]/c(\text{HCO}_3^-)<1/2$,表明直罗组正常基岩地下水中 HCO_3^- 主要来自脱硫酸作用。

3.4 直罗组地下水氢氧同位素特征

研究区所在的榆神府矿区大气降水 δD 介于 $10.78\text{‰} \sim -94.30\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 介于 $0.91\text{‰} \sim -13.20\text{‰}$,与全球降水线接近^[24-25]。利用研究区大气降水和直罗组、萨拉乌苏组地下水氢氧同位素测试数据,绘制了地下水 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 与降水线关系,如图 12 所示。由图 12 可知,萨拉乌苏组以及直罗组地下水点均偏离研究区降水线,且位于降水线下方,说明降水是研究区地下水的主要补给来源,但在补给过程中,经历了蒸发作用。直罗组正常基岩地下水和第四系萨拉乌苏组地下水样点 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 关系曲线的斜率小于榆神府矿区降水线斜率,说明水样受到一定程度的蒸发作用,萨拉乌苏组潜水线斜率更小,说明经历了更长时间的蒸发浓缩作用。

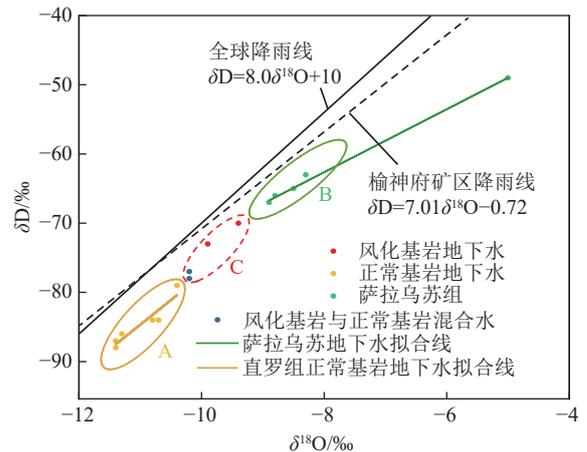


图 12 研究区地下水 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 与降水线关系

Fig.12 Relationship between groundwater $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ and precipitation line in the study area

4 水化学特征对直罗组与上覆含水层之间水力联系及地下水径流条件的指示

4.1 水化学特征对直罗组与上覆含水层之间水力联系的指示意义

(1) 氢氧同位素对直罗组与上覆含水层之间水力

联系的指示。萨拉乌苏组和直罗组地下水氢氧稳定同位素分布特征具有一定分区性,如图 12 所示。其中 A 区为直罗组正常基岩地下水, B 区为萨拉乌苏组地下水, C 区位于 A、B 区之间,为风化基岩地下水、风化基岩与正常基岩混合水。其中 A 区比 B 区氢氧同位素明显偏负,说明直罗组正常基岩地下水与萨拉乌苏组地下水补给来源不同。C 区位于 A、B 区之间,推测其与 A、B 两区存在一定的补排关系,其中风化基岩地下水与 B 区萨拉乌苏组地下水氢氧同位素靠近,说明其与萨拉乌苏组潜水补排关系更为紧密,而风化基岩与正常基岩混合水氢氧同位素更靠近 A 区直罗组正常基岩地下水,说明其与直罗组正常基岩地

下水补排关系更为紧密。

(2) 典型钻孔地下水化学离子毫克当量浓度对直罗组与上覆含水层之间水力联系的指示。为研究直罗组与其他地下水之间的水力联系,分别选取 5 个直罗组与萨拉乌苏组地下水分层取样钻孔, 1 个直罗组与洛河组地下水分层取样钻孔。Stiff 图能够直观的反映地下水特征,便于地下水类型的对比,可以为各含水层水力联系判别提供证据^[26]。8-HB6、SJ04、KS4 钻孔位于直罗组基岩风化区(图 13),直罗组上部直接与新近系或第四系接触。3 个钻孔萨拉乌苏组和直罗组地下水 Stiff 图形态相近,阴离子以 HCO_3^- 为主,阳离子以 Ca^{2+} 为主,说明直罗组风化基岩与萨拉乌苏

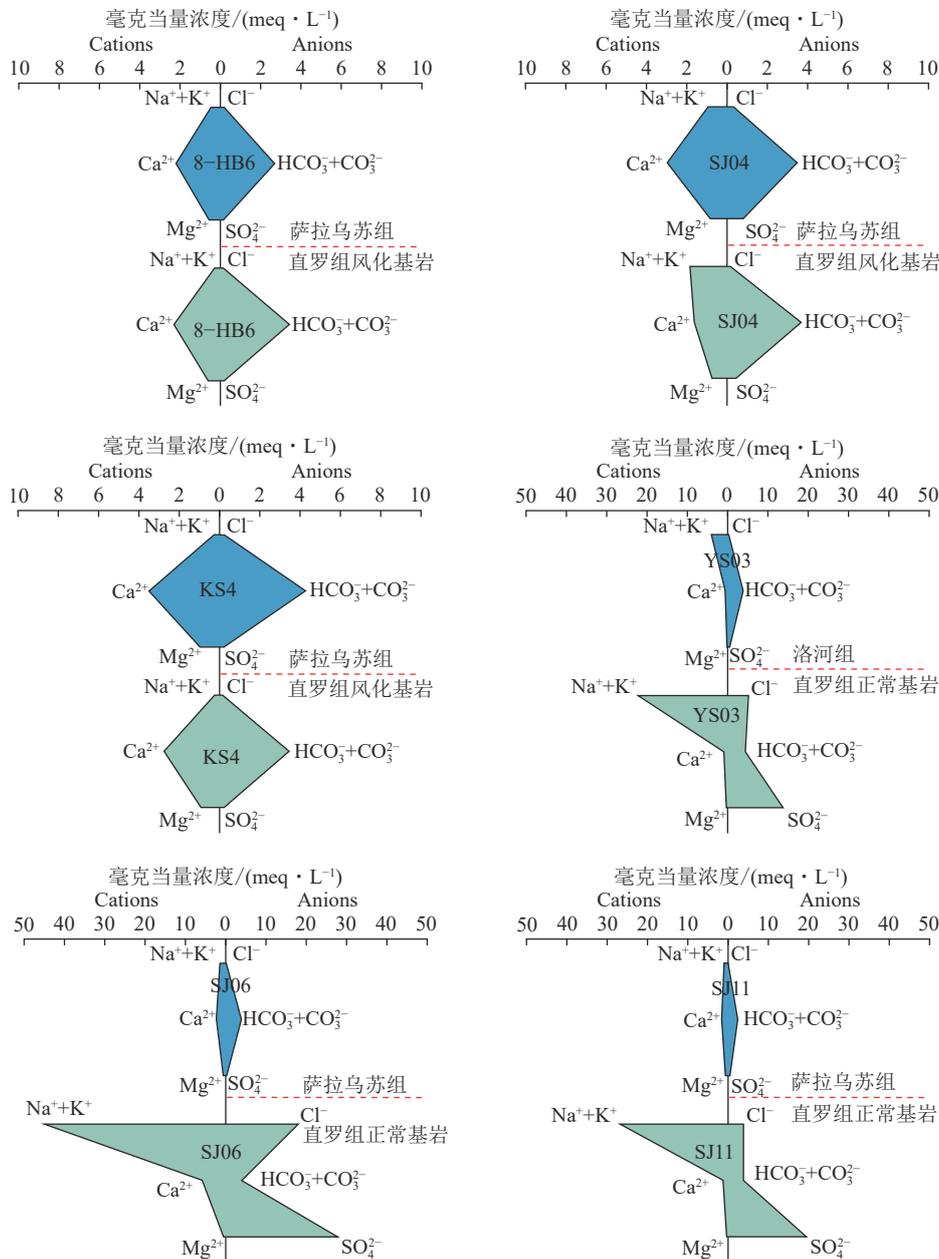


图 13 研究区典型钻孔地下水 Stiff 图

Fig.13 Stiff map of typical borehole groundwater in the study area

组地下水之间水力联系紧密, 存在补排关系。YS03、SJ06、SJ11 钻孔均位于研究区西部直罗组深埋区(图 13), 未遭受风化, 上覆直接接触地层为安定组。YS03 钻孔直罗组与洛河组地下水 Stiff 图存在明显差异, 阴离子中, 洛河组地下水以 HCO_3^- 为主, 直罗组地下水以 SO_4^{2-} 离子为主; 阳离子中, 2 层含水层阳离子均以 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 为主, 但直罗组地下水 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 离子毫克当量浓度高出洛河组 5 倍左右, 从水化学角度分析, 直罗组和洛河组地下水不存在水力联系, 或联系极其微弱。SJ06、SJ11 钻孔萨拉乌苏组与直罗组地下水 Stiff 图形态存在明显差异, 萨拉乌苏组地下水阴离子以 HCO_3^- 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 且毫克当量浓度均较小。而直罗组正常基岩地下水阴离子以 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为主, 阳离子以 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 为主, 离子毫克当量浓度总体较高。由此说明, 在研究区西部直罗组未遭受风化区域, 受上部安定组以及红土层的阻隔, 与洛河组、萨拉乌苏组地下水不存在水力联系, 或联系极其微弱。

(3) 区域地下水水化学特征对直罗组与上覆含水层之间水力联系的指示。通过因子分析手段可以用较少的因子概化地下水化学成分的影响因素, 进而分析其成因特征。理想条件下, 2 个无水力联系的含水层, 其成因不同。因此, 可以通过因子分析手段, 从区域上分析各含水层之间的水力联系^[27]。笔者对地下水中 7 种水化学指标进行因子分析, 最终提取 3 个公共因子 PC1、PC2 和 PC3, 累计方差贡献率达 87.50%, KMO(检验统计量) 为 0.635, 可以进行因子分析。通过计算, 旋转后的载荷矩阵见表 2, 其中, PC1 成分中 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、TDS、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 方差贡献率为 54.93%, PC2 成分中 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 方差贡献率为 19.98%, PC3 成分中 Ca^{2+} 方差贡献率为 12.59%。由旋转后的各类因子载荷分布图(图 14)可以看出, 3 个公共因子在载荷图上具有明显的区分度。

表 2 旋转后的因子载荷与方差贡献率

Table 2 Factor loadings and variance contribution rates after rotation

水化学指标	PC1	PC2	PC3
Na	0.991	-0.045	0.032
Ca	0.155	0.080	0.977
Mg	-0.241	0.772	0.135
HCO_3	0.152	0.856	-0.032
SO_4	0.962	-0.005	0.078
Cl	0.886	-0.097	0.136
TDS	0.986	0.018	0.099
特征值	3.85	1.400	0.880
方差贡献率/%	54.93	19.983	12.590
累积方差贡献率/%	54.93	74.913	87.504

根据各含水层样品的因子得分分布图(图 15)可以看出, 萨拉乌苏组地下水、大部分直罗组风化基岩地下水(包括风化基岩与正常基岩混合水)以及洛河组地下水在 PC1 的得分较小, 且分布区间比较集中, 基本在 $-0.5 \sim 0$, 而在 PC2、PC3 的得分分布区间相对较大, 分值 $-4 \sim 4$, 绝大多数为 $-2 \sim 2$, 说明这 3 类地下水水化学成分主要受控于 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} , 水化学成因存在一定的相似性。根据各含水层的空间叠置关系, 萨拉乌苏组分布于洛河组和直罗组风化基岩之上, 而洛河组与直罗组风化基岩之间不存在空间接触条件。由此可以判断, 在土层缺失或厚度较薄区域, 萨拉乌苏组与洛河组和直罗组风化基岩之间发生了水力交换。

直罗组正常基岩地下水水样点在 3 个成分因子的得分均波动较大, 说明水化学成分在空间上的分布比较复杂, 但总体来说在 PC1 和 PC3 的得分相对较大, 说明直罗组正常基岩地下水水化学成分主要受控于 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 。由 2 个成分得分散点图

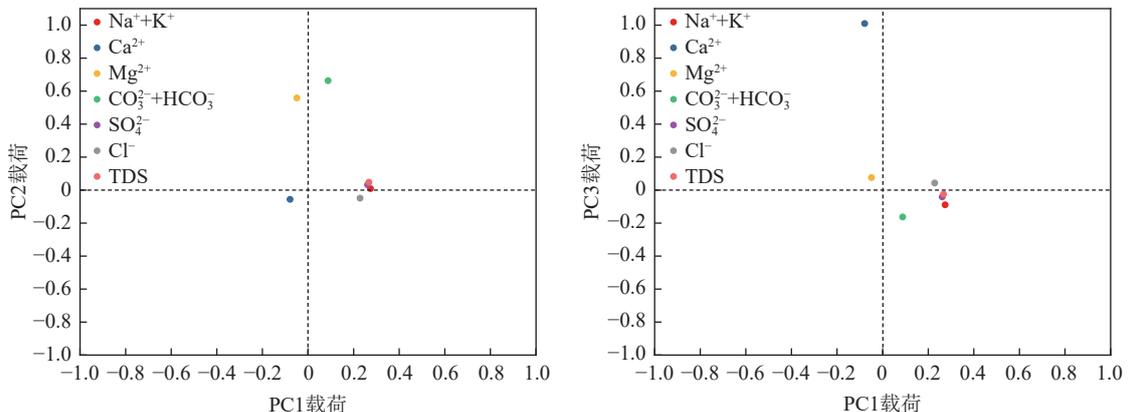


图 14 旋转后的各类因子载荷分布

Fig.14 Loading distribution of various factors after rotation

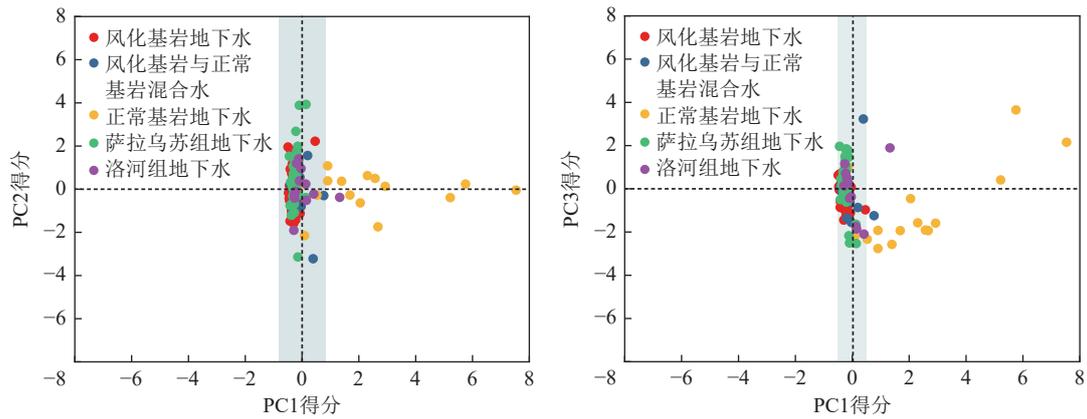


图 15 研究区地下水样主成分得分散点

Fig.15 Scatter plot of principal components of groundwater samples in the study area

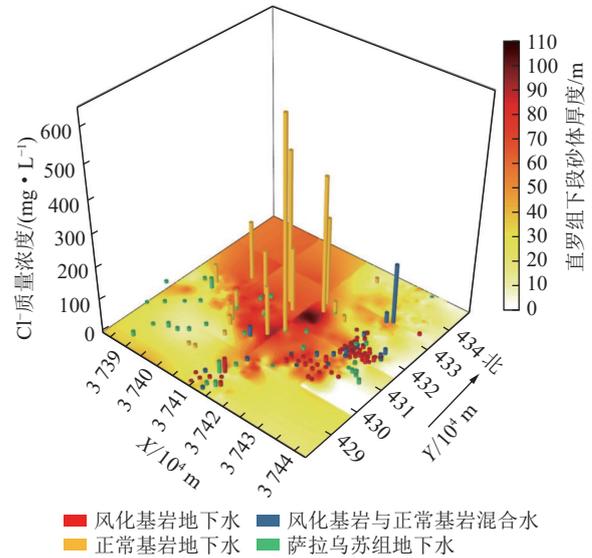
可知,直罗组正常基岩水样点得分与绝大多数萨拉乌苏组和洛河组水样点偏离较大,水化学成因存在较大差异,水力联系较弱。

4.2 卤族元素 Cl^- 对地下水径流条件的指示意义

地下水中 Cl^- 因化学性质稳定,电负性很高,氧化还原环境和 pH 对其影响均较弱,因此,在地下水径流过程中不发生化学价态和赋存形态的变化,被认为是守恒的地球化学示踪剂,能够指示地下水真实的运动状态,常用来分析地下水径流条件^[28]。

(1) Cl^- 质量浓度区域分布特征及其对地下水径流条件的指示。

图 16 为 Cl^- 质量浓度与直罗组古河道砂体分布空间关系,底部表示的是直罗组下段砂体厚度分布,不同颜色的圆柱体表示的是不同水样点 Cl^- 质量浓度, X、Y 轴表示的是平面投影坐标, Z 轴表示的是 Cl^- 质量浓度。从 Cl^- 质量浓度区域分布来看,在研究区的西部和东部,其质量浓度变化存在差异。西部安定组覆盖区,直罗组正常基岩地下水 Cl^- 质量浓度在研究区中部直罗组下段砂体厚度较大的区域(文献^[5]称之为主河道砂体)最大,向两侧砂体厚度较小区域逐渐降低,而东部基岩风化区,直罗组风化基岩地下水 Cl^- 质量浓度明显低于正常基岩。由此说明,在西部安定组覆盖区,直罗组地下水向直罗组下段砂体厚度较大的区域汇聚,由于地下水径流滞缓,受外界干扰程度小,经过长时间的缓慢径流和水岩作用, Cl^- 质量浓度在主河道砂体中心达到最大,地下水以静储量为。而在基岩风化区, Cl^- 质量浓度出现了急剧降低的趋势,结合前述风化基岩与第四系地下水水力联系的分析结果,在直罗组基岩风化区,砂岩孔隙、裂隙发育,储水性和渗透性明显增强,并与第四系地下水发生了强烈的混合作用,地下水径流强度大,水岩作用时间短,导致 Cl^- 质量浓度急剧降低,地下水以动储量为。

图 16 Cl^- 质量浓度与直罗组古河道砂体分布空间关系Fig.16 Spatial relationship between Cl^- concentration and the distribution of paleochannel sand bodies in the Zhiluo Formation

(2) Cl^- 质量浓度沿典型剖面变化特征及其对地下水径流条件的指示。

为研究 Cl^- 质量浓度沿典型剖面变化特征及其对地下水径流条件的指示,笔者在沿直罗组地下水流向选择 1 条剖面,垂直于地下水流向分别在西部直罗组深埋区和东部浅埋区各选择 1 条剖面,共计 3 条剖面进行探讨(图 17)。

图 18(a) 为研究区中部沿 NW—SE 方向直罗组地下水 Cl^- 质量浓度和 TDS 的变化特征曲线,在安定组覆盖区,直罗组埋藏较深,且未遭受风化作用影响, Cl^- 质量浓度高达 641.45 mg/L,地下水径流滞缓,矿化度较高, TDS 大于 2 000 mg/L; 向东至风化基岩过渡地带,沿地下水流向, Cl^- 质量浓度和 TDS 逐渐降低,在进入风化基岩区域后, Cl^- 质量浓度低至 10.92 mg/L, TDS 降低至 371.06 mg/L,与第四系萨拉乌苏组地下水接近。由此说明, Cl^- 质量浓度的变化表征了由西向

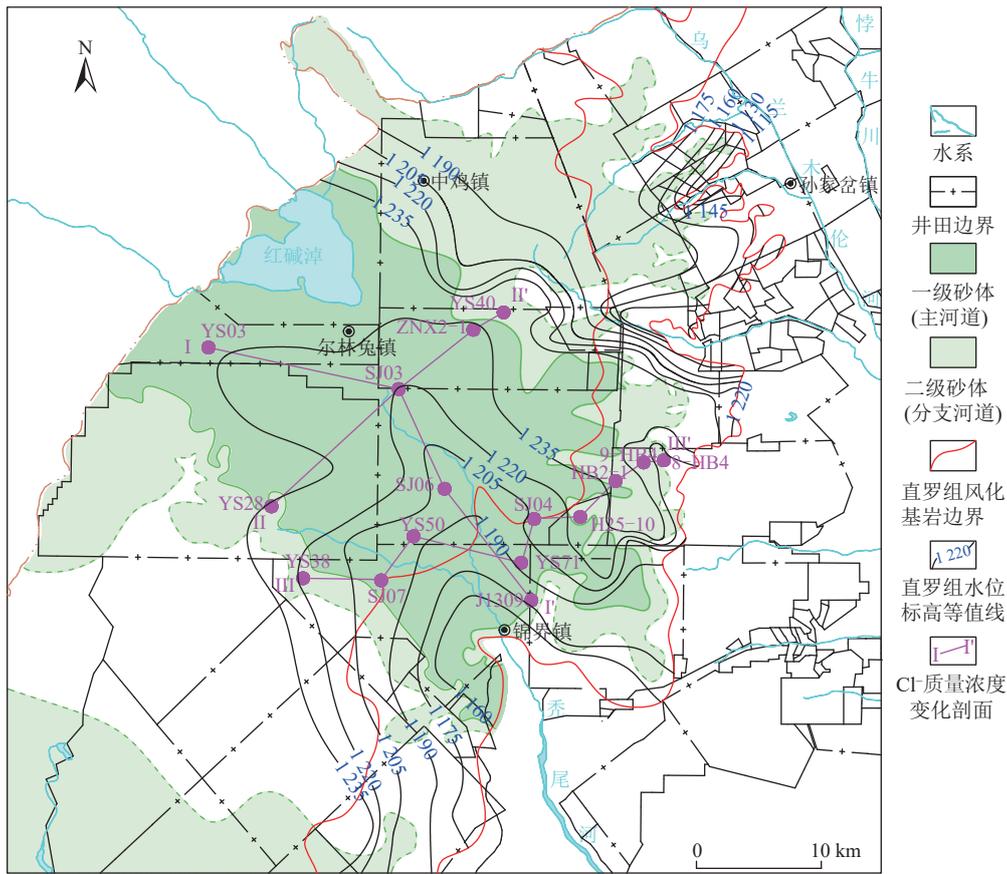


图 17 研究区直罗组水位标高等值线及 Cl^- 质量浓度变化剖面

Fig.17 Flow field and Cl^- content variation profile of the Zhiluo Formation in the study area

东地下水径流条件由弱到强的过程。

图 18(b) 为研究区西北部直罗组深埋区沿 WS—EN 方向上直罗组正常基岩地下水 Cl^- 质量浓度和 TDS 的变化特征曲线。 Cl^- 质量浓度和 TDS 由主河道砂体两侧向河道中心呈现出逐渐增大趋势,较好地验证了直罗组河道中心接受两侧地下水的补给,并在中心汇聚的区域地下水水流场形态。由于直罗组主河道砂体储水空间发育,具有良好的储水性能,在这种长期、缓慢的补给和径流不畅的水动力条件下,主河道砂体区域成为地下水的缓慢聚集中心,形成巨大的以静储量为主的含水层。

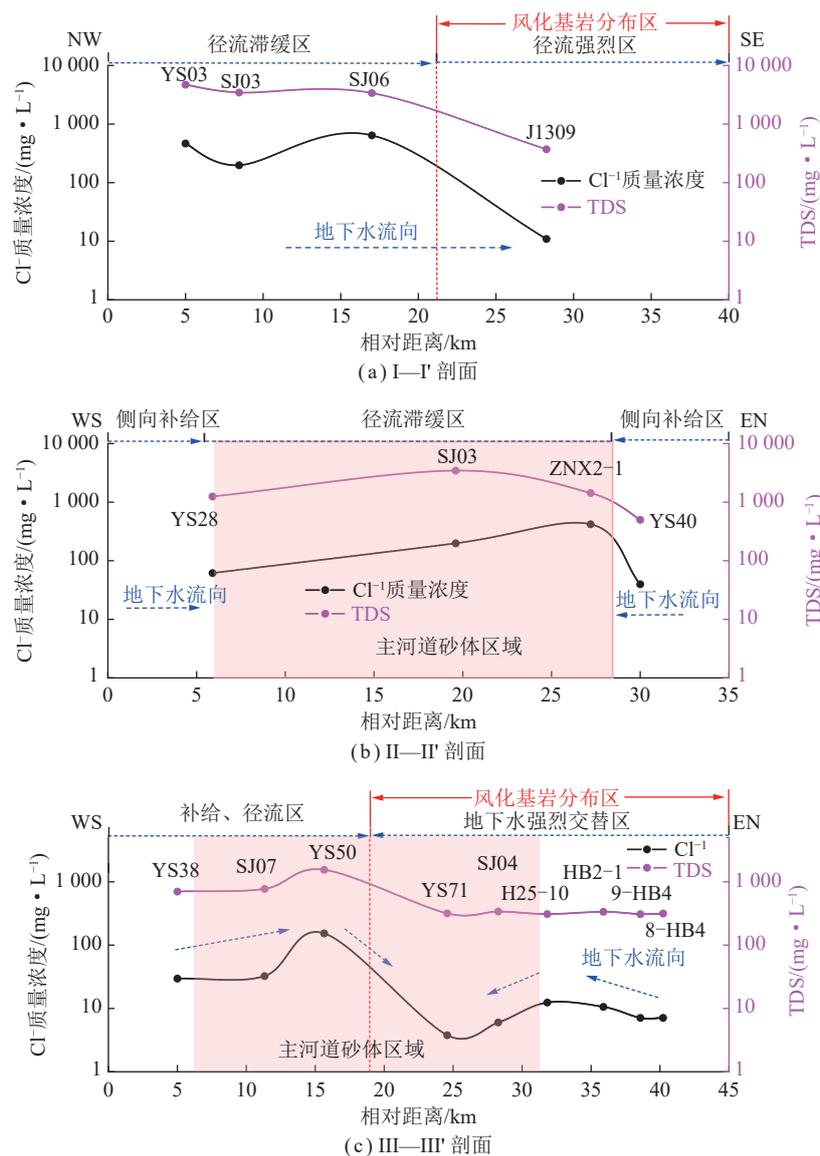
图 18(c) 为研究区东南部直罗组基岩风化区沿 WS—EN 方向直罗组正常基岩和基岩风化地下水 Cl^- 质量浓度和 TDS 的变化特征曲线。研究区东南部,受基岩风化的影响,地下水径流条件较为复杂, Cl^- 质量浓度和 TDS 的变化也较为复杂。对比区域直罗组地下水流场,正常基岩地下水由主河道砂体两侧向中心汇聚,并在西部高水头压力作用下,向东部基岩风化带径流、排泄。但根据 Cl^- 质量浓度的变化情况,局部地区呈现出与补给区至排泄区 Cl^- 质量浓度逐渐增大的规律不相符的现象,如 YS50~YS71 钻孔处出现浓

度降低趋势。通过分析地层结构发现,该区域土层缺失,在第四系地下水的下渗补给和直罗组地下水的顶托补给双重作用下,地下水混合交替强烈,造成 Cl^- 质量浓度和 TDS 明显降低。

5 结 论

(1) 直罗组基岩地下水、基岩与正常基岩混合水、正常基岩地下水中各离子浓度存在差异,相比而言,阳离子中正常基岩地下水 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 质量浓度最大, Ca^{2+} 质量浓度基本相等, Mg^{2+} 质量浓度变幅较小;阴离子中正常基岩地下水 SO_4^{2-} 、 Cl^- 质量浓度最大, HCO_3^- 质量浓度基本一致;直罗组正常基岩地下水矿化度明显高于其他 2 层地下水。总体而言,自西部正常基岩区至东部基岩风化区,地下水 pH 以及 TDS、 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 质量浓度均呈现出逐渐减小的趋势。

(2) 直罗组地下水水化学类型存在一定差异,西部直罗组埋藏较深区域,地下水水化学类型以 SO_4-Na 型、 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Na}$ 型为主。向东至直罗组基岩风化区,地下水类型过渡为 HCO_3-Ca 型和 $\text{HCO}_3-\text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 型等;直罗组地下水水化学形成受岩石风化作用、交替吸附作用、脱硫酸作用以及溶

图 18 研究区典型剖面 Cl^- 质量浓度与矿化度变化Fig. 18 Changes in Cl^- concentration and salinity in typical sections of the study area

滤作用的控制。

(3) 氢氧同位素和水化学特征对含水层之间水力联系具有明显的指示作用。氢氧同位素、典型钻孔地下水化学离子浓度和区域地下水水化学特征分析表明,研究区西部直罗组正常基岩地下水与洛河组、萨拉乌苏组地下水不存在水力联系。东部直罗组风化基岩与萨拉乌苏组地下水水力联系紧密,存在补排关系。

(4) 卤族元素 Cl^- 对直罗组地下水径流条件指示作用明显。通过对 Cl^- 质量浓度在区域和典型剖面变化特征的深入剖析,研究区西部直罗组正常基岩地下水径流滞缓,受外界干扰程度小,经过长时间的缓慢径流和水岩作用, Cl^- 质量浓度在直罗组古河道砂体中心区域达到最大,地下水以静储量为主;而在基岩风化区, Cl^- 质量浓度出现了急剧降低的趋势,由于直罗组风化基岩孔隙、裂隙发育,储水性和渗透性明显增

强,并与第四系地下水发生了强烈的混合作用,地下水径流强度大,水岩作用时间短, Cl^- 浓度急剧降低,地下水以动储量为主。

(5) 在研究区进行煤矿开采时,位于地下水强径流带的单个或连片矿井,地下水持续补给性强,建议采取以“堵”为主、以“疏”为辅的防控措施,尽可能地切断地下水持续径流通道,从源头上消除矿井水害隐患;位于局部富水性强、以静储量为主区域的矿井,采取以“疏”为主的防控措施,消除矿井水害隐患。

参考文献(References):

- [1] 董书宁,姬亚东,王皓,等.鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J].煤炭学报,2020,45(7):2367-2375.
DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal

- field of Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2367-2375.
- [2] 范立民, 迟宝锁, 王宏科, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组含水层研究进展与有害防治建议[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3535-3546.
FAN Limin, CHI Baosuo, WANG Hongke, et al. Research progress of aquifer of Zhiluo Formation in northern Ordos Basin and suggestions on water hazard prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3535-3546.
- [3] 武强, 赵苏启, 孙文洁, 等. 中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(6): 901-905.
WU Qiang, ZHAO Suqi, SUN Wenjie, et al. Classification of the hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(6): 901-905.
- [4] 范立民, 孙魁, 李成, 等. 榆神矿区煤矿防治水的几点思考[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 182-188.
FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, et al. Thoughts on mine water control and treatment in Yushen mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 182-188.
- [5] 孙魁, 苗彦平, 陈小绳, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组赋存特征及富水性[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3572-3598.
SUN Kui, MIAO Yanping, CHEN Xiaosheng, et al. Occurrence characteristics and water abundance of Zhiluo Formation in northern Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3572-3598.
- [6] 徐蓉桢, 魏世博, 李成业, 等. 基于水化学与环境同位素的额济纳平原区域地下水循环规律解析[J]. *地学前缘*, 2023, 30(4): 440-450.
XU Rongzhen, WEI Shibo, LI Chengye, et al. Groundwater circulation in the Ejina Plain: Insights from hydrochemical and environmental isotope studies[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(4): 440-450.
- [7] 王焰新, 马腾, 郭清海, 等. 地下水与环境变化研究[J]. *地学前缘*, 2005, 12(S1): 14-21.
WANG Yanxin, MA Teng, GUO Qinghai, et al. Groundwater and environmental change[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(S1): 14-21.
- [8] 张保建, 张克, 高宗军, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系地下水系统及矿井防治水对策[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(3): 122-128.
ZHANG Baojian, ZHANG Ke, GAO Zongju, et al. Jurassic underground water system in Ordos Basin and mine water prevention and control countermeasures[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(3): 122-128.
- [9] 范立民, 马万超, 常波峰, 等. 榆神府矿区地下水水化学特征及形成机理[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 383-394.
FAN Limin, MA Wanchao, CHANG Bofeng, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of groundwater in Yushenfu Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 383-394.
- [10] 孙亚军, 张莉, 徐智敏, 等. 煤矿区矿井水水质形成与演化的多场作用机制及研究进展[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 423-437.
SUN Yajun, ZHANG Li, XU Zhimin, et al. Multi-field action mechanism and research progress of coal mine water quality formation and evolution[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 423-437.
- [11] 董东林, 武强, 钱增江, 等. 榆神府矿区水环境评价模型[J]. *煤炭学报*, 2006, 31(6): 776-780.
DONG Donglin, WU Qiang, QIAN Zengjiang, et al. Water environment assessment model in Yushenfu mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(6): 776-780.
- [12] 谢臣臣, 孙魁, 吴亚坤, 等. 神府矿区直罗组含水层水质形成的水文地球化学过程研究[J]. *水利水电技术*, 2023, 54(1): 151-162.
XIE Chenchen, SUN Kui, WU Yakun, et al. Research of hydrogeochemical process of water quality formation of Zhiluo Formation Aquifer in Shenfu Mining area[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(1): 151-162.
- [13] 靳德武, 王甜甜, 赵宝峰, 等. 宁东煤田东北部高矿化度地下水分布特征及形成机制[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(7): 118-127.
JIN Dewu, WANG Tiantian, ZHAO Baofeng, et al. Distribution characteristics and formation mechanism of high salinity groundwater in northeast Ningdong Coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(7): 118-127.
- [14] 曾一凡, 梅傲霜, 武强, 等. 基于水化学场与水动力场示踪模拟耦合的矿井涌(突)水水源判别[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4482-4494.
ZENG Yifan, MEI Aoshuang, WU Qiang, et al. Source discrimination of mine water inflow or inrush using hydrochemical field and hydrodynamic field tracer simulation coupling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4482-4494.
- [15] 刘基. 呼吉尔特矿区深埋含水层水文地球化学特征及其指示意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(1): 154-159.
LIU Ji. Hydrogeochemical characteristics of deep buried aquifer in Hujerte mining area and its implications[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(1): 154-159.
- [16] 王强民, 王皓, 杨建, 等. 西部侏罗系矿区充水含水层水文地球化学特征及矿井水来源综合识别[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1084-1093.
WANG Qiangmin, WANG Hao, YANG Jian, et al. Hydrogeochemical characteristics of main water filled aquifers and source indicators of mine water intypical Jurassic mine area of western China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1084-1093.
- [17] 柳菲, 凌新颖, 马金珠, 等. 基于Cl⁻和氧氢稳定同位素的敦煌盆地地下水演化与补给[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(3): 319-325.
LIU Fei, LING Xinying, MA Jinzhu, et al. Groundwater recharge and geochemical evolution of Dunhuang Basin based on Cl⁻, δ¹⁸O and δD[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2019, 55(3): 319-325.
- [18] 王双明. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.

- [19] 李振宏,董树文,冯胜斌,等.鄂尔多斯盆地中—晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. *地球学报*, 2015, 36(1): 22–30.
LI Zhenhong, DONG Shuwen, FENG Shengqu, et al. Sedimentary Response to Middle–Late Jurassic Tectonic Events in the Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(1): 22–30.
- [20] HUANG X J, WANG G C, LIANG X Y, et al. Hydrochemical and Stable Isotope (δD and $\delta^{18}O$) Characteristics of Groundwater and Hydrogeochemical Processes in the Ningtiaota Coalfield, Northwest China[J]. *Mine Water and the Environment*, 2018, 37(1): 119–136.
- [21] 刘凯旋,刘启蒙,柴辉婵,等.孙疃矿区地下水化学特征及其控制因素研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(4): 74–79.
LIU Kaixuan, LIU Qimeng, CHAI Huichan, et al. Chemical characteristics and control factors of groundwater in Suntuan Coal Mine[J]. *Coal Engineering*, 2019, 51(4): 74–79.
- [22] LI P Y, TIAN R, LIU R. Solute geochemistry and multivariate analysis of water quality in the Guohua Phosphorite Mine, Guizhou Province, China[J]. *Exposure and Health*, 2019, 11(2): 81–94.
- [23] 汪子涛,刘启蒙,刘瑜.淮南煤田地下水水化学空间分布及其形成作用[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 40–47.
WANG Zitao, LIU Qimeng, LIU Yu. Spatial distribution and formation of groundwater hydrochemistry in Huainan coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 40–47.
- [24] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702–1703.
- [25] 王力,卫三平,张青峰,等.榆神府矿区土壤–植被–大气系统中水分的稳定性同位素特征[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(8): 1347–1353.
WANG Li, WEI Sanping, ZHANG Qingfeng, et al. Isotopic characteristics of water within the soil-vegetation-atmosphere system in the Yushenfu mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(8): 1347–1353.
- [26] 董兴玲.榆神矿区锦界矿含水层水化学特征及矿井水来源分析[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 32(10): 35–39.
HUANG Xingling. Aquifer hydrochemical features and mine water source analysis in Jinjie Coalmine, Yushen Mining Area[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(10): 35–39.
- [27] 黄磊,侯泽明,韩萱,等.采煤驱动下复杂井田含水层化学特征与水力联系辨识[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2697–2706.
WANG Lei, HOU Zeming, HAN Xuan, et al. Identification of chemical characteristics and hydraulic connection of each aquifer in complex mine field driven by coal mining[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2697–2706.
- [28] HAN G, LIU C. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province[J]. *China Chemical Geology*, 2004, 204(1–2): 1–21.